Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 855-862

GRANALLADO DE PRETENSIONADO III: COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE ALTO NUMERO DE CICLOS

G.H. Rubiolo [b], M. Ortiz [b] y J. Vera Alvarado [a]

[a] Instituto de Tecnología "Jorge A. Sábato" (CNEA-UNSAM), Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Av. Del Libertador 8250, (1429) Buenos Aires, Argentina.

[b] Departamento Materiales- Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Avda. del Libertador 8250, (1429) Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se ha obtenido evidencia experimental sobre el comportamiento en fatiga de un material granallado ensayando un acero AISI 5160 con microestructura martensítica revenida.

La producción de tensiones residuales sobre las probetas para fatiga se realizó con una granalladora a turbina utilizando granalla de acero y un tiempo de granallado fijo. La curva S-N se obtuvo con una máquina de flexión rotativa. Además, se caracterizó la relajación de tensiones residuales durante el proceso de fatiga, para diferentes amplitudes de carga, utilizando la técnica de DRX.

Se observó un leve incremento del límite de fatiga por efecto del granallado mientras que la vida finita a semiamplitud máxima de la tensión cíclica constante disminuye considerablemente. Las tensiones residuales, medidas en profundidad, evolucionan fuertemente con el ciclado reduciendo su capacidad de frenar la propagación de microfisuras. Para tensiones máximas aplicadas del orden del límite de fatiga o superiores, la evolución de las tensiones residuales superficiales muestra tres etapas: un transitorio inicial, un estadío con derivada constante y un terciario acelerado. Debajo del límite de fatiga desaparecen la segunda y tercer etapa mientras que el transitorio inicial satura.

La vida en fatiga del material granallado fue modelada en función de la curva S-N del material vírgen, el campo de tensiones residuales y la rugosidad resultante del granallado. El efecto de la relajación de las tensiones residuales durante la fatiga fue también incluído. Modelo y resultados experimentales son contrastados y discutidos.

Palabras claves

Fatiga, Granallado, Tensiones Residuales, Difracción de rayos X, AISI 5160

INTRODUCCION

El granallado de pretensionado mejora el comportamiento a la fatiga, sin embargo el efecto benéfico varia según las condiciones de granallado y de carga.

Landgraf y colab., según la cita de referencia [1], muestran que una probeta templada y granallada tiene mayor resistencia a la fatiga que otra que ha sido sólo templada y que cuanto mayor es el diámetro de granalla se consigue incrementar aún más la resistencia a la fatiga.

También determinan que si existe el mismo nivel de tensiones en compresión en superficie pero mayor profundidad de perfil entonces el comportamiento en fatiga es diferente.

Nelson y colab. [2], estudiaron el efecto de las condiciones de granallado sobre la resistencia a la fatiga de tres aceros de durezas diferentes (63, 50 y 20 HRC) y dos intensidades de granallado (Almen 0.024 A-2 y Almen 0.016 C-2). Muestran que cuando la dureza del material aumenta la sensibilidad de la resistencia a la fatiga al granallado disminuye. Para el acero de dureza 63 HRC, la resistencia del material granallado es menor que la del material no granallado. Concluyen que: a) los defectos introducidos por granallado dentro de estos aceros hace que se comporten como fisuras y la dimensión de estos defectos varía según la dureza del material y la intensidad del granallado; y, b) la probabilidad de encontrar defectos en profundidad aumenta al aumentar la intensidad del granallado y al disminuir la dureza del material.

Mattson, según la cita de referencia [3], compara diferentes tiempos de exposición de granallado y la intensidad Almen con la resistencia de vida en fatiga a un mismo nivel de tensiones. Muestra que a partir de tiempos para el cual la saturación es obtenida sobre muestras Almen; el número de ciclos a rotura no aumenta sensiblemente.

Pollak, según la cita de referencia [4], muestra que existe una tasa de recubrimiento óptima para el límite de fatiga, este punto óptimo varia al variar el tamaño de granallas, si la granalla es más grande se conseguirá este punto óptimo con una menor tasa de recubrimiento.

Relajación de la tensiones residuales generadas por granallado fueron observadas en aceros pero no en aluminio [5]. Esta relajación existe aún para tensiones aplicadas menores que el límite de fatiga [6].

La fractura por fatiga de una probeta granallada puede iniciarse bien en la superficie o en una zona debajo de la capa endurecida. Las tensiones residuales inducidas por el granallado mueve el máximo de la tensión neta (residual más aplicada) en tracción a una posición debajo de la capa endurecida donde el límite de fatiga local es cercano al material vírgen, el incremento de su aparente límite de fatiga esta vinculado a que la tensión aplicada en tracción disminuye hacia el interior de la probeta cuando es ensayada en flexión rotativa. En este caso, la fractura es sub-superficial.

Sin embargo, en el material granallado surge otro máximo local en la superficie como consecuencia de la rugosidad que genera un factor de concentración de tensiones. Ambos máximos locales pueden entonces competir y la fractura puede resultar superficial.

Varios modelos han sido desarrollados para predecir la curva S-N de un material granallado [7,8], en ellos se han considerado los siguientes efectos:

- Campo de tensiones residuales compresivas
- Rugosidad superficial
- Endurecimiento o ablandamiento cíclico de la capa superficial
- Corrimiento de la posición de la fisura inicial

En ninguno de estos modelos se ha considerado el efecto de daño producido en la capa superficial afectada por el granallado.

En este trabajo se ha obtenido evidencia experimental sobre el comportamiento en fatiga del material granallado ensayando un acero AISI 5160 con microestructura martensítica revenida. La vida en fatiga del material granallado fue modelada en función de la curva S-N del material vírgen, el campo de tensiones residuales y la rugosidad resultante del granallado. El efecto de la relajación de las tensiones residuales durante la fatiga fue también incluído. Modelo y resultados experimentales son contrastados y discutidos.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material en estudio es un acero de baja aleación según norma AISI 5160. Su composición química, parámetros del tratamiento térmico de templado y revenido, dureza y propiedades mecánicas pueden hallarse en ref [9].

Los ensayos de fatiga se realizaron a flexión rotativa, con una frecuencia de 50 Hertz y a temperatura ambiente. Las probetas fueron preparadas de acuerdo al requerimiento de la máquina de fatiga Schenk [10], sus dimensiones se muestran Figura 1.

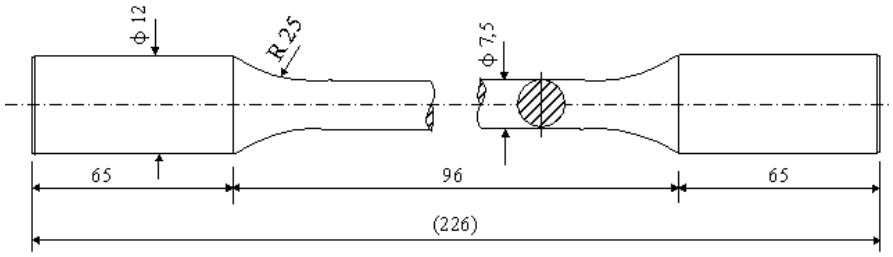

Figura 1. Geometría de la probeta de fatiga.

El terminado superficial de las probetas para fatiga se lleva a cabo con papel lija 220, 320 y 400, hasta alcanzar una rugosidad superficial R_z = 1,0 – 1,5 μm.

Las probetas fueron granalladas en una máquina a turbina utilizando granallas de acero de 1 mm de diámetro y un tiempo de exposición de 90 segundos.

La medición del campo de tensiones residuales se realizó con la técnica de DRX utilizando un equipo Rigaku Strainflex y mediante el método del $\sin^2\psi$ [9, 11]. Para las medidas en profundidad se fueron removiendo capas de material, en una zona localizada, mediante pulido químico.

La rugosidad superficial se caracterizó con los parámetros R_a y R_z [12] mediante un rugosímetro Taylor-Hobson (Norma DIN 4760).

RESULTADOS

La rugosidad de las probetas para fatiga granalladas se obtuvieron haciendo tres medidas sobre diferentes líneas paralelas al eje y en diferentes zonas de la superficie de la probeta en la zona de ensayo. El promedio sobre tres probetas dio como resultado un valor de R_z = 18 – 21 μm.

Las curvas de Wöhler para el acero AISI 5160 sin granallar y granallado se muestran en Figura 2. Ellas fueron obtenidas en flexión rotativa, utilizando el método “estándar” [13] , y son representadas a través de la variación de la semiamplitud máxima de la tensión cíclica (**S**) versus el número de ciclos para la falla ($\mathbf{N_f}$).

Aún cuando el método “estandar” no permite desarrollar una información estadística confiable, es interesante notar que mientras el límite de fatiga se ha incrementado, la vida finita a semiamplitud máxima de la tensión cíclica constante ha disminuído considerablemente. Ambos hechos, comparados con los resultados presentados por otros investigadores [14], indicarían que el material fue granallado con una intensidad superior a la conveniente para un óptimo comportamiento en fatiga (sobre-granallado).

Considerando que un aumento excesivo de la rugosidad puede ser una de las consecuencias del sobre-granallado, se realizaron dos ensayos de fatiga con S= 550 MPa en probetas granalladas a las cuales se les rectificó la superficie con papel de lija hasta número 600 retirando una capa de aproximadamente 20 μm de espesor. Los resultados son indicados

en Figura 2. Como puede observarse la vida finita de estas probetas granalladas y rectificadas en su superficie es aún menor que la del material sin granallar e indica que el sobre-granallado a provocado un daño mayor en las capas sub-superficiales y es ese daño el responsable de acortar la vida finita.

La observación de la superficie de fractura por microscopía electrónica de barrido muestra que en todos los casos el origen de la fractura es superficial aún para la probeta que tuvo su superficie rectificada [15].

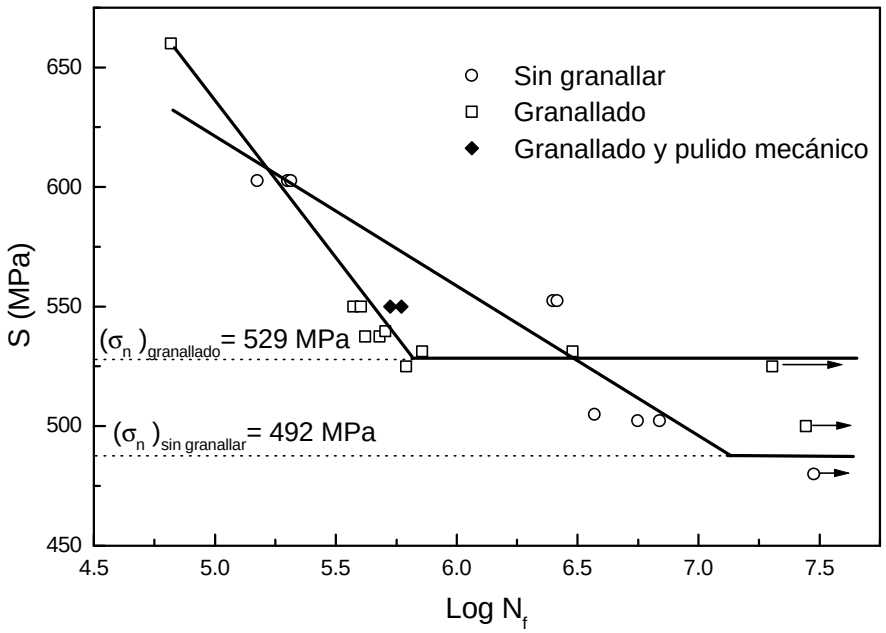

Figura 2.Curvas de Wöhler para el acero AISI 5160 en las condiciones sin granallar y granallado.

El perfil de tensiones residuales (TR) σ^{DL} , de la probeta no fatigada, medido en profundidad se observa en Figura 3. Se destaca el hecho de que las TR en superficie tienen un valor muy similar al obtenido con granalla de vidrio en las probetas planas del mismo material [9], mientras que, el pico más intenso de TR debajo de la superficie está mejor desarrollado y la profundidad del perfil es mucho mayor. En la misma Figura se muestra el perfil de TR medido en profundidad para una probeta ciclada a S = 660 MPa, se observa que las tensiones residuales evolucionan fuertemente en el interior del material reduciendo su capacidad de frenar la propagación de microfisuras.

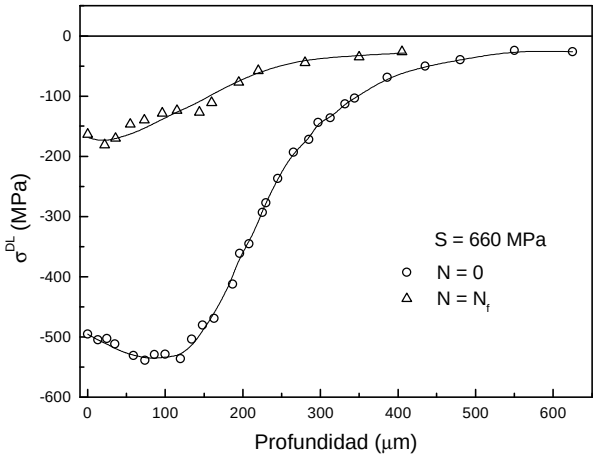

Figura 3. Perfil de tensiones residuales medido en profundidad

Se estudió la evolución de las TR σ^{DL} en superficie con el número de ciclos. La tensión σ^{DL} fue seguida en tres puntos (centro y centro ± 2 cm) de una misma generatriz de la zona calibrada de la probeta. La Figura 4 muestra el promedio de σ^{DL} para tres tensiones máximas aplicadas correspondientes a la tensión de diseño, límite de fatiga y 5% por arriba del límite de fatiga. Para tensiones máximas aplicadas del orden del límite de fatiga o superiores, la evolución de σ^{DL} muestra tres etapas: un transitorio inicial, un estadío con derivada constante y un terciario acelerado. Debajo del límite de fatiga desaparecen la segunda y tercer etapa mientras que el transitorio inicial satura.

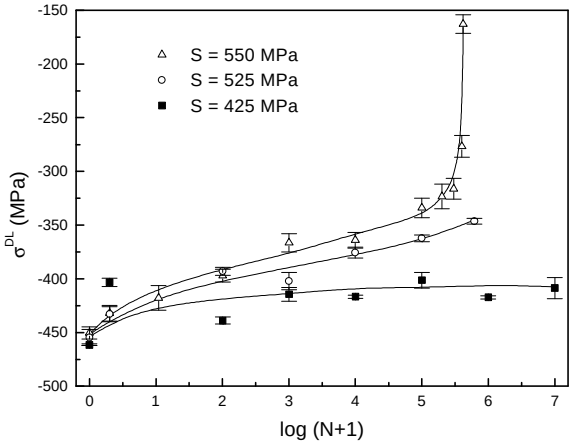

Figura 4. Evolución de σ^{DL} con el número de ciclos en fatiga.

DISCUSION

El pretensionado por granallado prolonga la vida de componentes mecánicos sometidos a fatiga. Por lo tanto, sería muy importante predecir esta mejora mediante cálculos para optimizar los parámetros del granallado y la forma de los componentes y así reducir costos mientras incrementamos la resistencia en fatiga.

La predicción de la vida de un componente granallado debe basarse en el conocimiento experimental de los fenómenos que influyen en el comportamiento en fatiga (deformaciones plásticas, tensiones residuales, relajación, daño, rugosidad, fisuras, etc.) y en el uso de modelos de cálculo (leyes de comportamiento plástico, criterios de fractura y daño por fatiga, etc.).

Nuestros resultados experimentales muestran que la modelización de la curva S-N del material granallado debería considerar los efectos mencionados con una fisura inicial superficial, pero además, debería considerar el efecto de daño puesto que la vida finita de nuestro material es menor que la del material virgen en un entorno cercano al límite de fatiga.

En una primera aproximación no consideraremos en la modelización el relajamiento cíclico de las tensiones residuales iniciales ya que ello oscurecería el análisis, a posteriori discutiremos como podría incluirse dicho efecto en el modelo.

Con las consideraciones expuestas arriba, las hipótesis de nuestro modelo son las siguientes:

i. Durante el proceso de granallado la capa superficial del material vírgen sufre daño por fatiga. Esta hipótesis es coherente con el modelo utilizado para predecir el campo de tensiones residuales resultante de dicho proceso [16].
ii. El campo de tensiones residuales en la capa superficial modifica la tensión media del ciclo de tensión aplicado en dicha capa.
iii. La rugosidad superficial ó fisuras superficiales, introducidas durante el granallado, actúan como concentradores de tensiones.

Durante la modelización del campo de tensiones residuales generado por el granallado aceptamos que la capa más superficial sufre un proceso de fatiga. Para evaluar este daño utilizamos la teoría de daño acumulativo de Marin [17]; pero, como esta teoría puede usarse sólo para la vida finita en fatiga de materiales que presentan límite de fatiga definido como los

aceros, entonces, el cambio del límite de fatiga producido por el daño es evaluado con una expresión utilizada en la teoría de daño acumulativo de Henry [18].

Para evaluar el efecto del campo de tensiones residuales sobre la vida en fatiga del material granallado, nuestra propuesta es utilizar el promedio de las tensiones residuales en la capa superficial como la tensión media del ciclo de fatiga en la relación de Goodman [13] para el efecto de la tensión media sobre la vida en fatiga.

La rugosidad ó la fisuración superficial producida por el granallado introducirá un concentrador de tensiones que debe ser evaluado. Dicho concentrador elevará el valor de la carga en superficie respecto del valor nominal de la carga. En el caso de la rugosidad, el factor del concentrador de tensiones, **K**., fue evaluado con una relación propuesta en ref [8].

Con estas hipótesis, la expresión matemática para la curva S-N del material granallado es [15],

$$n_{(S)} = N_{(S_1)} \left(\frac{S_1 \left(1 - \frac{S_m}{S_u} \right)}{K\ S} \right)^d \left[1 - \frac{S'_n}{S_n} \right] \qquad K\ S^*_n = S'_n \left(1 - \frac{S_m}{S_u} \right)$$

donde:

S_1 = nivel de amplitud de tensión aplicado durante el granallado, estimado en el modelado del perfil de tensiones residuales generado por granallado [16].

$N_{(S_1)}$ = número de ciclos a rotura del material vírgen al nivel de amplitud de tensión S_1

S_m = valor de la tensión residual en superficie, estimado en el modelado del perfil de tensiones residuales generado por granallado [16].

S_u = valor de la tensión de ruptura del material vírgen en ensayo de tracción [9].

d = Constante que depende del material ensayado [19]. Para aceros su valor esta entre 6.2 y 6.9.

S'_n = Límite de fatiga del material granallado sin considerar los efectos de la rugosidad y las tensiones residuales. Se calcula con la expresión $S'_n = S_n \frac{n_{(S_1)}}{N_{(S_1)}}$ donde $n_{(S_1)}$ es el número de ciclos aplicados durante el granallado y esta relacionado con el número de impactos de las granallas.

S^*_n = límite de fatiga del material granallado

La Figura 5 muestra las curvas de ajuste para el material granallado y para un material que fuera dañado en igual forma que el material granallado pero que no tiene tensiones residuales ni concentradores de tensiones en su superficie.

Para el ajuste se ha utilizado un valor de S'_n = 443 MPa, esto implica un número de ciclos de fatiga durante el granallado de $n_{(S_1)} = 8.10^5$. Este resultado no es coherente ya que implica un número de impactos mucho mayor que el estimado por las condiciones del granallado impuesto. Creemos que el modelo sobreestima este parámetro como consecuencia de no considerar la relajación de las tensiones residuales durante la fatiga.

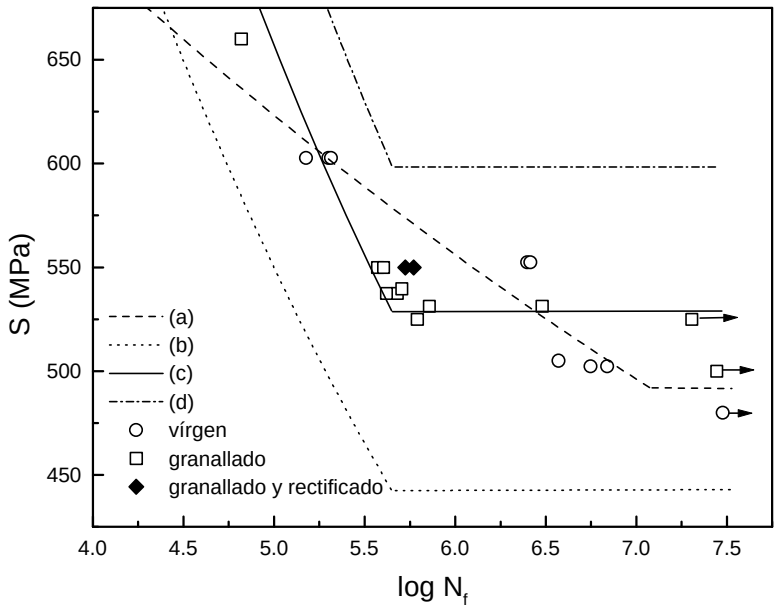

Figura 5. Curvas S-N predichas por la modelización del efecto del granallado sobre la vida en fatiga. (a) Material vírgen, (b) Material vírgen dañado por granallado sin influencia de tensiones residuales y concentradores de tensiones superficiales, (c) Material vírgen dañado por granallado con influencia de tensiones residuales y K=1.26, (d) Material vírgen dañado por granallado con influencia de tensiones residuales y K=1.11

Dentro de las hipótesis del modelo desarrollado para predecir la curva S-N del material granallado, la relajación de tensiones residuales podría incluirse a través del valor que $\mathbf{S_m}$ toma para cada nivel **S** de la amplitud de carga aplicada durante un dado número **n** de ciclos y aplicando la teoría de daño acumulativo de Marin. Las modificaciones que deben introducirse a este modelo para considerar la relajación de tensiones residuales puede consultarse en ref [15].

CONCLUSIONES

Basados en resultados experimentales obtenidos con un acero AISI 5160 templado y revenido, se ha realizado un análisis cuantitativo para predecir la resistencia en fatiga de este material cuando es sometido a un proceso de granallado. Cuatro factores han sido identificados como los más importantes para realizar una predicción de dicha propiedad mecánica:

a) El perfil de tensiones residuales generado por el granallado, en especial, el nivel de tensión cíclica que dio origen al campo de tensiones residuales en la superficie de la probeta.
b) El daño producido por el granallado en el material de la superficie de la probeta.
c) El efecto producido por las tensiones residuales y su relajación sobre la vida en fatiga del material dañado de la superficie de la probeta..
d) El efecto producido por la rugosidad y/o la fisuración superficial generadas durante el granallado actuando como concentradores de tensiones

REFERENCIAS

1. M. Lemaitre, J. L. Lebrun, G. Maeder. Contraintes residuelles et fatigue. Matériaux et Techniques, ENSAM, Septembre-Octobre , Paris, 297-305, 1982.
2. Nelson, Ricklefs, Evans. The role of residual stresses in increasing long life fatigue strength of notched machine members. ASTM STP 467, American Society for testing and materials, 228-253, 1970.
3. P. Flavenot,A. Niku-Lari. Le grenaillage de precontrainte. CETIM, note technique Nr 15, París, Francia, 1976.
4. J. Farrahi. Optimisation du grenaillage. Rapport de DEA ENSAM, París, 1980.
5. S. A. Meguid, D. W. Hammond. Fatigue Fracture and Residual Stress Relaxation in Shot-Peened Components. International Conference on Residual Stress. ICRS 2, Nancy, France, 797-802,1989.
6. G. Fang; K. W. Xu, D. Q. Zhang. Effect of Cyclic Stress and Temperature on Residual Stress Relaxation. International Conference on Residual Stress. ICRS 2, Nancy, France, 759-764, 1989.
7. M. Desvignes, B. Gentil, L. Castex. International Conference on Residual Stress, ICRS 2, Nancy, France, 791-796, 1989.
8. M. Yao, J. Li., P. Shao, S. Wang, R. Wang, X. Li. International Conference on Residual Stress, ICRS 4, Baltimore, Maryland, USA, 1002-1007, 1994.
9. J. Vera Alvarado, M. Ortiz, G.H. Rubiolo. Granallado de pretensionado I: Caracterización por difracción de rayos X. Enviado a Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga.
10. Manual de instrucciones. Carl Schenk Maschinenfabrik GmbH, Darmstadt, Deuchtland.
11. L. Castex, J. L. Lebrun, G. Maeder, J.M. Sprauel. Determination des contraintes residuelles par diffraction des rayon X. Publications Scientifiques et Techniques Nr. 22, ENSAM, Paris, 1981.
12. I. Nuñez P. Rugosidad, un resumen conceptual. Oficina Técnica de Palazzolo S.A., 1992.
13. J.A. Collins. Failure of materials in mechanical design. John Wiley & Sons, N.Y, Chapter 8, 215-224, 1981.
14. E. Gariboldi, W. Nicodemi, P. Pellini, G. Silva, M. Vedani. Strength and surface finish: influence on fatigue behaviour of steels. Metall. Sci. Tech., 13, 65-74, 1995.
15. J. Vera Alvarado. Estudio del efecto del granallado en la vida residual por fatiga mediante monitoreo de las tensiones residuales. Tesis de Maestría, UNSAM, Argentina, 2000.
16. P. Gargano, M. Ortiz.. Granallado de pretensionado II: Modelo elastoplástico para la generacion de tensiones residuales Enviado a Jornadas SAM 2000 – IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga.
17. J. Marin. Mechanical behavior of engineering materials. Prentice Hall, N.J., 1962
18. D.L. Henry. Theory of fatigue damage accumulation in steel, ASME Transactions, 77, 913, 1955.
19. H.T. Corten, T.J. Dolan. Cumulative fatigue damage. Proceedings of International Conference on Fatigue of Metals, ASME and IME, 235, 1956.